

光机电一体化丛书

光机电一体化 理论基础

殷际英 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

光机电一体化理论基础

殷际英 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

内 容 提 要

本书内容涉及作为光机电一体化技术基础的主要应用理论, 包括光电子学理论基础——辐射度学与光度学理论、晶体半导体能带模型与光电效应理论和固体成像理论; 信号与系统分析理论基础——信号的积分变换、信号的离散变换和系统的状态空间; 现代机械设计理论基础——行星变速系统综合理论、2 自由度行星传动运动学分析、相似理论、机械优化设计和有限元分析; 机器人设计理论基础——机器人运动学、机器人动力学、轨迹规划和机器人控制。并分析了一些理论应用实例。本书理论与实际密切结合, 既有普及性和实用性, 又具有一定深度, 逻辑性强, 并配有适量图表, 易于掌握和使用。

本书可作为光机电一体化系统应用和开发人员的技术理论基础参考书, 以及大专院校机械专业本科生和研究生相关专业课程的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

光机电一体化理论基础/殷际英编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 7
(光机电一体化丛书)
ISBN 7-5025-7449-2

I. 光… II. 殷… III. 光电技术-机电一体化-理论 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 076603 号

光机电一体化丛书 光机电一体化理论基础

殷际英 编著
责任编辑: 任文斗
文字编辑: 韩庆利
责任校对: 顾淑云 宋 玮
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 22¼ 字数 544 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7449-2

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《光机电一体化丛书》编辑委员会

主 任 林 宋

副主任 王生则 赵丁选 罗 均

委 员 (排名不分先后)

林 宋	王生则	赵丁选	罗 均	胥信平	黎 放
胡于进	何 勇	谢少荣	高国富	崔桂芝	殷际英
方建军	郭瑜茹	徐盛林	文秀兰	周洪江	刘杰生
蒋 蓁	王 琦	杨野平	王东军	尚国清	叶天朝
戴 荣	刘 勇	裴晓黎			

序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合,是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面:光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品,具有很高的功能和附加值;光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用 and 发展的技术。

目前,国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业,光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性,受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注,在提升传统产业的过程中,它以其高度的创新性、渗透性和增值性,成为未来制造业的支柱,被誉为 21 世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新技术发展项目。

随着光机电一体化技术的不断发展,各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。《光机电一体化丛书》第一批(共 9 册)的出版,受到了广大读者的欢迎。为满足读者的进一步需求,我们联合北方工业大学、上海交通大学、东华大学、华中科技大学、海军工程大学、北京机械工程学院、中国船舶工业集团船舶系统工程部、上海大学、吉林大学、江汉大学、河南理工大学等高校的教师及科研部门的工程技术人员编写《光机电一体化丛书》第二批(共 21 册),拟在 2005 年初开始陆续出版发行,主要内容为光机电一体化技术在测试传感、驱动控制、激光加工、精密加工、机器人等方面的应用,以满足科研单位、企业和高等院校的科研及生产和教学的需求,为有关工程技术人员在开发光机电一体化产品时,提供有价值的参考素材。

本丛书的基本特点是:①内容新颖,力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果;②系统全面,丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例,重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法;③深入浅出,每本书重点突出,注重理论联系实际,既有一定的理论深度,又具有很强的实用性,力求满足不同层次读者的需求,适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛,相关技术发展迅速,加之作者水平有限,时间紧促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家、学者和读者不吝赐教。

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2004 年 10 月于北京

前 言

光机电一体化技术是由光学、光电子学、微电子、信息和机械及其他相关技术交叉与融合而构成的综合性高新技术,也是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。光机电一体化技术扩展了机电一体化技术的应用领域,从加工系统到医疗仪器、从家用电器到军事装备都离不开它。信息、材料、能源、空间、海洋等高科技领域的技术发展和产业化、传统产业的技术改造、武器装备的现代化都要用到光机电一体化技术。

进入 21 世纪以来,随着更新和更高级的光机电一体化产品的加速涌现,光机电一体化技术正在向着更广和更深的层次发展,这就要求从事光机电一体化领域开发的科技人员必须跟上技术进步的频率,在注重技术更新,强化实际动手能力能力的同时,还要重视不断培养和增强自身基础理论水平。惟有如此,才能收到以不变应万变的效果,在日新月异的技术更新过程中立于不败之地,这就是本书编写的最主要目的。

基于上述目的,本书在内容选择方面基本涵盖了支撑光机电一体化技术的主要基础理论,全书按所涉及基础理论归类分为 4 篇,共 16 章,各篇章的顺序安排便于读者学习和掌握。其中,第 1 篇介绍了光电子学理论基础,包括 3 章内容,即辐射度学与光度学基础理论,晶体半导体能带模型与光电效应理论和固体成像理论基础;第 2 篇介绍了信号与系统分析理论基础,包括 4 章内容,即信号与系统概述,信号的积分变换,信号的离散变换和系统的状态空间;第 3 篇介绍了现代机械设计理论基础,包括 5 章内容,即行星变速系统综合理论基础,2 自由度行星传动运动学分析,相似理论基础,机械优化设计和有限元分析,并分析了一些作者参加进行的设计计算实例;第 4 篇介绍了机器人设计理论基础,包括 4 章内容,即机器人运动学,机器人动力学,轨迹规划和机器人控制,并分析了作者参加研制的机器人系统的一些运动学和动力学计算实例。本书所介绍的基础理论偏重普及性、实用性和包容性,并配有适量说明图表。本书尽量避免出现无益的、且过于繁复冗长的公式导出过程,在内容深度和语言叙述方面力求面向不同层次的读者。

本书可作为从事机械工程领域或其他工程领域中光机电一体化技术应用和开发人员的技术参考书,以及大专院校机械工程类相关专业本科生和研究生的学习参考书。

本书主要由殷际英编写和统稿,参加编写的还有崔桂芝、徐宏海、田建君、张超英、谢富春、胡春江、白传栋、孟荣光、张若青、景作军、吴壮志。

由于编者水平所限,书中难免有缺点和错误,敬请读者提出宝贵的意见。

编者

2005 年 4 月

目 录

第 1 篇 光电子学理论基础

第 1 章 辐射度学与光度学基础理论	1
1.1 辐射度学和光度学基本物理量	1
1.1.1 辐射度学基本物理量	1
1.1.2 光度学基本物理量	2
1.2 辐射度学与光度学中的基本定律	3
1.2.1 余弦定律	3
1.2.2 距离平方反比定律	4
1.2.3 亮度守恒定律	5
1.3 黑体辐射基本定律	6
1.3.1 基尔霍夫定律	6
1.3.2 普朗克辐射公式	7
1.3.3 维恩位移定律	7
1.3.4 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	7
1.3.5 色温	7
第 2 章 晶体半导体能带模型与光电效应理论	8
2.1 晶体半导体能带模型	8
2.2 热平衡下的载流子浓度	11
2.2.1 能级密度	12
2.2.2 费米能级和电子占据能态的概率	12
2.2.3 平衡载流子浓度	12
2.2.4 本征半导体中的载流子浓度	13
2.2.5 掺杂半导体载流子浓度	14
2.3 半导体中的非平衡载流子	14
2.3.1 本征吸收	15
2.3.2 杂质吸收	15
2.3.3 非平衡载流子浓度	16
2.4 载流子的扩散与漂移	16
2.4.1 扩散	16
2.4.2 漂移	17
2.5 半导体的光电效应	17
2.5.1 光电导效应	17

2.5.2	p-n 结光伏效应	18
2.6	光电导探测器——光敏电阻	19
2.6.1	光敏电阻的工作原理	19
2.6.2	光敏电阻的主要特性参数	21
2.7	光生伏特探测器——光电池和光电二极管	22
2.7.1	光伏探测器的工作模式	23
2.7.2	光伏探测器的伏安特性	23
2.7.3	光电池	24
2.7.4	光电二极管	25
2.8	发光二极管与光电耦合器	27
2.8.1	发光二极管	27
2.8.2	发光二极管的特性	27
2.8.3	光电耦合器的结构与工作原理	28
2.9	半导体色敏器件及应用	28
2.9.1	半导体色敏器件的工作原理	28
2.9.2	双色硅色敏器件测色电路	29
2.10	红外探测器	31
2.10.1	红外辐射的基本知识	31
2.10.2	红外探测器分类	31
第3章	固体成像理论基础	35
3.1	固体电荷耦合成像器件	35
3.1.1	CCD 工作的基本原理简介	35
3.1.2	CCD 的特性参数	40
3.2	电荷耦合摄像器件	40
3.2.1	一维线阵 CCID	41
3.2.2	二维面阵 CCID	41
3.2.3	三相驱动一维 CCID 器件	42

第2篇 信号与系统分析理论基础

第4章	信号与系统概述	45
4.1	信号概述	45
4.1.1	信号的分类	45
4.1.2	典型连续信号	47
4.1.3	典型离散信号	49
4.2	连续信号的正交分解	54
4.2.1	分解正交函数分量	54
4.2.2	函数分解为三角函数	55
4.3	系统概述	56
4.3.1	连续时间系统的描述	56
4.3.2	离散时间系统的描述	57

4.3.3 系统的分类	58
第5章 信号的积分变换	61
5.1 非周期信号的傅里叶变换	61
5.1.1 周期信号的频谱	61
5.1.2 非周期信号的傅里叶变换	62
5.1.3 常用非周期信号的频谱	63
5.1.4 奇异函数的傅里叶变换	65
5.2 傅里叶变换的性质	68
5.2.1 线性特性	68
5.2.2 奇偶性	68
5.2.3 对称性	69
5.2.4 尺度变换特性	69
5.2.5 时移特性	69
5.2.6 频移特性	69
5.2.7 微分特性	71
5.2.8 积分特性	71
5.3 卷积定理	71
5.3.1 时域卷积定理	71
5.3.2 频域卷积定理	72
5.4 周期信号的傅里叶变换	72
5.5 抽样信号的傅里叶变换	73
5.5.1 抽样信号及其频谱	73
5.5.2 抽样定理	75
5.6 拉普拉斯变换	75
5.6.1 拉普拉斯变换基本概念	75
5.6.2 拉普拉斯变换的性质	77
5.6.3 线性系统的拉普拉斯变换	79
5.6.4 系统传递函数	81
5.6.5 传递函数的零点和极点	82
5.6.6 传递函数的零极点分布与系统响应形式之间的关系	85
5.7 连续系统的稳定性分析	85
5.7.1 系统的稳定性	85
5.7.2 罗斯判据	86
第6章 信号的离散变换	88
6.1 离散傅里叶变换的概念	88
6.1.1 周期序列离散傅里叶级数	88
6.1.2 离散傅里叶变换	89
6.1.3 离散傅里叶变换的主要特性	90
6.2 Z变换	90
6.2.1 Z变换的定义	90

6.2.2 Z 变换的性质	92
6.3 离散系统的 Z 域分析	95
6.3.1 用 Z 变换解线性常系数差分方程	95
6.3.2 离散系统的传递函数	97
6.3.3 传递函数的零极点分布与单位样值响应的关系	98
6.3.4 离散系统的稳定性定义	98
第 7 章 系统的状态空间	99
7.1 系统的状态方程	99
7.2 传递函数描述的系统状态空间	100
7.2.1 直接法	100
7.2.2 串联法	101
7.2.3 并联法	102
7.3 离散系统状态空间	105
7.3.1 连续状态空间的离散化	105
7.3.2 状态空间的差分方程式	106
7.3.3 由 z 传递函数求状态空间表达式	107

第 3 篇 现代机械设计理论基础

第 8 章 行星变速系统综合理论基础	108
8.1 概述	108
8.2 复杂行星传动系统的解析运动学	110
8.2.1 差速机构运动学基本方程式	110
8.2.2 差速机构运动学实例分析	112
8.3 2 自由度行星变速箱角速度平面图	117
第 9 章 2 自由度行星传动运动学分析	120
9.1 行星传动运动学简图	120
9.2 行星传动的静力学和动力学	123
9.3 确定行星传动效率的理论方法	126
9.3.1 力的位移法	126
9.3.2 啮合功率法	127
9.3.3 转换机构法	128
第 10 章 相似理论基础	131
10.1 相似概念	131
10.2 相似方法的基本原理	134
10.2.1 相似的实质	134
10.2.2 相似的数学表达式	135
10.2.3 相似准则	136
10.2.4 准则方程	138
10.2.5 模拟的一般原理	139
10.3 相似方法的数学工具	142

10.3.1	求相似准则的方法	142
10.3.2	准则方程的推导方法	145
10.4	相似性设计计算	146
10.4.1	几何相似系列设计	146
10.4.2	散热翅片传热能力的相似计算	146
10.5	相似理论的意义及应用	148
第 11 章	机械优化设计	150
11.1	优化设计概论	150
11.1.1	引言	150
11.1.2	两个简单的优化事例	151
11.2	优化设计的数学模型	153
11.2.1	优化问题的数学描述	153
11.2.2	优化设计数学模型	155
11.2.3	优化问题的几何解释	158
11.3	优化设计基本理论	160
11.3.1	目标函数的方向导数和梯度	160
11.3.2	目标函数的无约束极值	165
11.3.3	约束问题的最优解条件	168
11.4	一维搜索	170
11.4.1	搜索区间的确定(进退法)	170
11.4.2	黄金分割法	172
11.4.3	二次插值法	174
11.5	无约束优化方法	176
11.5.1	无约束优化方法概述	176
11.5.2	主要无约束优化方法	176
11.6	约束优化方法	181
11.6.1	约束优化问题的惩罚函数法——序列无约束极小化法	181
11.6.2	多目标优化方法	185
11.6.3	建立约束优化设计模型实例——平面铰链四杆机构再现运动规律的优化设计问题	187
11.7	模糊理论在优化设计中的运用	189
11.7.1	模糊评价方法概述	189
11.7.2	模糊优化方法的执行步骤	193
11.7.3	具有模糊约束条件的优化设计实例——振动机槽体质量的模糊优化算法	193
11.7.4	齿轮传动系统模糊优化设计实例	197
第 12 章	有限元分析	201
12.1	有限元法概论	201
12.1.1	有限元法的要点	201
12.1.2	有限元法的特性	201

12.2 有限元法的基本理论	202
12.2.1 加权余量法	202
12.2.2 变分原理和里兹法	205
12.2.3 弹性力学平面问题基本方程	208
12.3 弹性力学平面问题的有限元分析	213
12.3.1 弹性力学平面问题的有限元法格式	213
12.3.2 基于最小位能原理的有限元方程	218
12.3.3 三角形单元的等效结点载荷列阵	222
12.3.4 引入位移边界条件	224
12.3.5 三角形单元应力计算实例	225
12.4 单元类型与插值函数	229
12.4.1 一维单元	230
12.4.2 三角形单元	233
12.4.3 矩形单元	235
12.5 等参单元和数值积分	236
12.5.1 4 结点四边形等参单元	237
12.5.2 高斯数值积分法	240
12.5.3 8 结点曲边四边形等参单元	241
12.6 杆系结构的有限元法	243
12.6.1 局部坐标系下的单元刚度矩阵	243
12.6.2 平面杆单元的坐标转换	244

第 4 篇 机器人设计理论基础

第 13 章 机器人运动学	247
13.1 数学基础	247
13.1.1 手坐标系和基坐标系	247
13.1.2 位置和姿态的描述——齐次变换	247
13.1.3 齐次坐标变换	250
13.1.4 齐次坐标变换的逆变换	254
13.1.5 变换方程的概念	255
13.1.6 通用旋转变换	256
13.2 机器人的位姿分析	258
13.2.1 机器人的位姿与运动描述	259
13.2.2 6 自由度机器人运动方程	262
13.3 机器人的速度分析	269
13.3.1 机器人的微分运动	269
13.3.2 机器人的雅可比矩阵	274
13.3.3 6 关节机器人的雅可比矩阵	276
第 14 章 机器人动力学	283
14.1 拉格朗日方程	283

14.2 机器人连杆系统拉格朗日方程	283
14.2.1 连杆上一点的运动学分析	284
14.2.2 连杆上一点的动能和位能	285
14.2.3 动力学方程的推导	287
14.3 机器人连杆系统动力学方程的简化	289
14.3.1 惯量项的简化	289
14.3.2 重力项的简化	290
14.4 机器人连杆系统动力学方程分析实例	290
14.5 机器人的稳态负荷	295
14.5.1 静力和静力矩的表示	296
14.5.2 不同坐标系间静力的变换	296
14.5.3 关节力矩的确定	298
第15章 轨迹规划	299
15.1 轨迹规划概述	299
15.2 机器人轨迹的插值计算	300
15.2.1 轨迹插值的概念	300
15.2.2 定时插补与定距插补	301
15.2.3 直线插补算法	301
15.2.4 圆弧插补算法	302
15.2.5 其他插补技术	304
15.3 机器人手部操作路径的轨迹规划	309
15.3.1 物体对象的描述	309
15.3.2 作业的描述	309
第16章 机器人控制	314
16.1 机器人的位置控制	314
16.1.1 直流电动机伺服控制系统的数学模型	315
16.1.2 单关节位置控制器的传递函数	317
16.2 机器人控制理论及算法	320
16.2.1 机器人的分解运动速度控制	320
16.2.2 分解运动加速度控制	323
16.2.3 计算力矩控制	324
16.2.4 变结构控制	327
16.2.5 机器人的人工神经网络控制	328
16.2.6 基于遗传算法的机器人神经网络控制	332
参考文献	340

第 1 篇 光电子学理论基础

第 1 章 辐射度学与光度学基础理论

1.1 辐射度学和光度学基本物理量

在光电系统中，光是信息的携带者。产生光辐射的光源在系统中是必不可少的。光的光谱辐射能量（或强度）、频率、振幅均可携带和传播各种信息。光电系统中的辐射源其辐射光谱范围是紫外光波段、可见光波段和红外光波段。紫外光波段为 $0.01 \sim 0.32 \mu\text{m}$ ，可见光波段为 $0.32 \sim 0.78 \mu\text{m}$ ，红外光波段为 $0.78 \sim 300 \mu\text{m}$ 。目前，光源和光电探测器所能覆盖的主要波段小于 $40 \mu\text{m}$ 。光电系统广泛使用的波段小于 $14 \mu\text{m}$ 。实际上没有一个光源能发出包括上述所有波长范围的辐射。实用光源只是其中某一波长或某一段光谱范围的辐射。所以，实用光源的种类是很多的。

光电系统中所用的光源可简单地划分为自然光源和人造自然光源两类。自然光源组成被动光电系统。人造光源可组成主动光电系统，但是按照光源的工作机理分类更能突出其辐射性质和特点。这样光源可分为热辐射源、受激辐射源（激光器）、复合辐射源（电致辐射）、光致辐射源、化学发光源和生物发光源等。其中前三种光源应用最广泛。

早期主要研究的是电磁辐射中的可见光，就相应产生了光通量、光强、亮度、照度等光度学量，以描述不同情况下人眼对光的敏感程度。但是，由于这些光度学量是以人眼对可见光刺激所产生的视觉为基础的，所以它受到了主观视觉的限制，不是客观的物理学描述方法。在光电子技术及其应用中，经常要遇到的是包括可见光在内的各种波段电磁辐射量的计算和测量，显然不能再采用光度学量，必须采用不受人们主观视觉限制、建立在物理测量基础上的辐射度量学量，光度学量只能视为辐射度量学量的特例。

为了区别起见，在对应的物理量符号标角标“e”表示辐射度，标角标“v”表示光度。下面分别介绍这两套单位体系中的物理量。

1.1.1 辐射度学基本物理量

(1) 辐射能 Q_e

辐射能是一种以辐射形式发射、传播或接收的能量，单位为 J。

(2) 辐射功率 P_e

辐射功率又称辐射能通量（ Φ_e ），它是发射、传播或接收辐射能量的时间变化率，单位为 W，其定义为

$$P_e = \Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

(3) 辐射射出度 M_e

辐射出射度又称辐射通量密度，单位为 W/m^2 。它是描述面源辐射特性的量，其数值是源的单位面积向半球空间发射的辐射功率，定义为

$$M_e = \frac{dP_e}{dA} \quad (1-2)$$

式中 A ——辐射源面积， m^2 。

(4) 辐射强度 I_e

辐射强度是点辐射源在单位球面角内发射的辐射功率，如图 1-1 所示。辐射强度定义为

$$I_e = \frac{dP_e}{d\Omega} \quad (\text{W}/\text{sr}) \quad (1-3)$$

式中 Ω ——点辐射源所张的球面立体角， sr 。

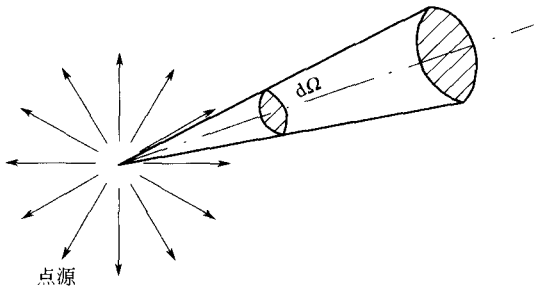


图 1-1 辐射强度的定义

(5) 辐射亮度 L_e

辐射亮度是为描述扩展源（指尺寸很大的辐射源）辐射功率在空间和扩展源表面上的分布情况而引入的量。辐射亮度定义为辐射扩展源表面上一点处的小面积元 dA 在给定方向上的辐射强度 I_e 除以该面元在垂直于此方向上的正投影面积，如图 1-2 所示。

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 P_e}{dA d\Omega \cos \theta} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})] \quad (1-4)$$

(6) 辐射照度 E_e

以上讨论的各个辐射量都是描述辐射源发射特性的量。为了描述受照表面接收辐射功率的分布情况，引入辐射照度这个量。

假设辐射源投射到被照表面某点附近小面积 dA 上的辐射功率为 dP_e ，则被照表面该点辐射照度 E_e 为

$$E_e = \frac{dP_e}{dA} \quad (1-5)$$

其意义表示投射被照面上单位面积上的辐射功率，单位为 W/m^2 。虽然它与辐射出射度的单位相同，但两者的物理意义不同。

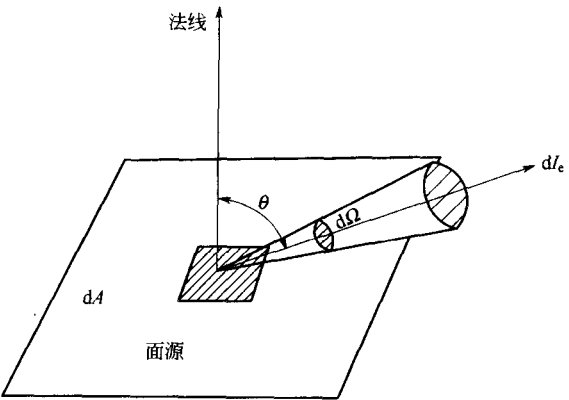


图 1-2 辐射亮度的定义

(7) 光谱辐射量 $\Phi_e(\lambda)$

任何一个辐射源发出的辐射或投射到一个表面上的辐射通量 Φ_e 都有一定的频率分布特征，即光谱辐射量 $\Phi_e(\lambda)$ 。光谱辐射量是辐射通量 Φ_e 随波长 λ 的变化率，即

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1-6)$$

对于所讨论过的其他基本辐射量均可定义类似相应的关系。

1.1.2 光度学基本物理量

光度学涉及的是电磁辐射中能引起视觉响应的那部分辐射场。所以光度学量是辐射度量学量的特例。在研究方法上和概念上基本相同，并且光度学量与辐射度量学量是一一对应的。

光通量用 P_v 表示。由它出发，按与辐射度量学同样定义方法，可以定义出光度学中的

其他量，如光出射度用 M_v 表示；光强度用 $I_{\Omega v}$ 表示；光亮度用 L_v 表示，光照度用 E_v 表示。相应的定义式和单位分别为

光出射度

$$M_v = \frac{dP_v}{dA} \quad (\text{lx}) \quad (1-7)$$

光强度

$$I_{\Omega v} = \frac{dP_v}{d\Omega} \quad (\text{cd}) \quad (1-8)$$

光亮度

$$L_v = \frac{d^2 P_v}{dA d\Omega \cos\theta} \quad [\text{lm}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})] \quad (1-9)$$

光照度

$$E_v = \frac{dP_v}{dA} \quad (\text{lx}) \quad (1-10)$$

这里所选用的符号与辐射度量学量相同，只是在右下方的角标为 v 。

实验证明，辐射功率相同但波长不同的光所引起的视觉响应（眼睛感到的明亮程度）是不相同的。在可见光谱中，人眼对光谱中部的黄绿色（ $\lambda=555\text{nm}$ ）最敏感，愈靠近光谱两端，愈不敏感，对于可见光区以外的其他波长的辐射则不能察觉。

由于人眼的光谱响应特性，所以对于不同波长的单色光，要产生相同的视觉响应，就必须要有不同的辐射功率。在引起相同视觉响应条件下，若在波长 λ 附近所需要的光谱辐射功率为 dP_λ ，而对 $\lambda=555\text{nm}$ 所需要的光谱辐射功率为 dP_{555} ，则定义

$$V(\lambda) = \frac{dP_{555}}{dP_\lambda}$$

为波长 λ 的视见函数（相对光谱视见函数），如图 1-3 所示为视见函数曲线。

显然，人眼对波长为 555nm 的光的视见函数为 1，其他波长的视见函数值都小于 1，不可见区的视见函数值都等于零。视见函数值大的波长，表示对这种波长辐射的视觉灵敏度高，亦即视觉响应强。视见函数曲线是正常人眼对不同波长光的光谱响应。

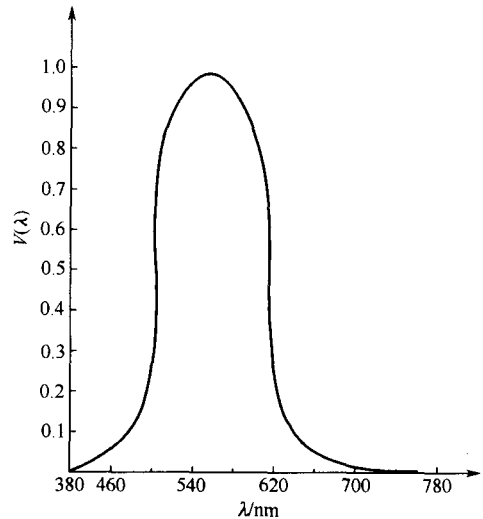


图 1-3 视见函数曲线

1.2 辐射度学与光度学中的基本定律

1.2.1 余弦定律

由图 1-4 可见，与光束传输方向成 θ 角的表面积 S' 和它在垂直传播方向上的投影面积 S 对 O 点所张的立体角 Ω 是相同的。在该立体角内点光源发出的辐射通量不随传输距离而变化。这样，投影面积 S 和 S' 的表面上的辐射照度 E_e 和 E'_e 分别为

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S} \quad \text{和} \quad E'_e = \frac{\Phi_e}{S'}$$

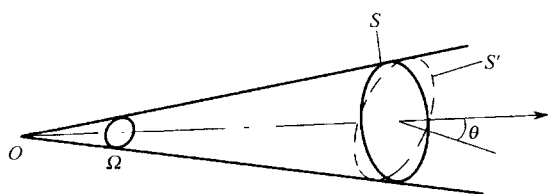


图 1-4 点光源光能的传输

因为 $S = S' \cos \theta$, 所以

$$E'_e = E \cos \theta \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-11)$$

这就是辐射照度的余弦定律。它表明, 任一表面上的辐射照度随该表面法线和辐射能传输方向之间夹角的余弦而变化。

余弦定律的另一种情况是对完全漫射体而言的, 也称朗伯余弦定律。朗伯把理想漫辐射表面定义为: 在任意发射(漫射、透射)方向上辐射亮度不变的表面, 即对任何 θ 角 L_e 为恒定值。通常把具有这种特性的表面称为朗伯表面, 它们的辐射亮度与辐射方向无关, 例如太阳、荧光屏、毛玻璃灯罩、坦克表面等都近似于这种光源。辐射亮度与辐射方向无关的辐射源, 称为漫辐射源。

如图 1-5 所示。由辐射亮度的定义: 法线方向上辐射强度为 I_0 、表面积为 dA 的辐射表面, 其辐射亮度为 I_0/dA , 而沿与表面法线成 θ 角方向的辐射亮度为 $I_\theta/(dA \cos \theta)$ 。对于朗伯表面有 $I_0/dA = I_\theta/(dA \cos \theta)$, 所以

$$I_\theta = I_0 \cos \theta \quad (1-12)$$

即朗伯辐射表面在某方向上的辐射强度随与该方向和表面法线之间夹角的余弦而变化。

如果以代表法线方向上的辐射强度值的线段为直径作一个与表面 dA 相切的球, 那么由表面 dA 的中心向某 θ 角方向到球面交点的矢量长度, 就表示该方向的辐射强度的大小。

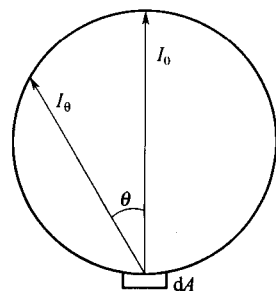


图 1-5 朗伯辐射表面的余弦定律

1.2.2 距离平方反比定律

点光源在传输方向上某点的辐射照度和该点到点光源的距离平方成反比。

距离平方反比定律是来自均匀点光源向空间发射球面波的特性, 在任一锥立体角内, 假设在传输路径上没有光能损失或分束, 则由点光源向空间发出的辐射能通量 Φ 是不变的, 然而位于球心的均匀点光源所张的立体角所截的表面积却和球半径 R 的平方成正比, 这样在球表面上的辐射照度 E 就和点光源到该表面的距离的平方成反比, 即

$$E = \frac{\Phi}{4\pi R^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-13)$$

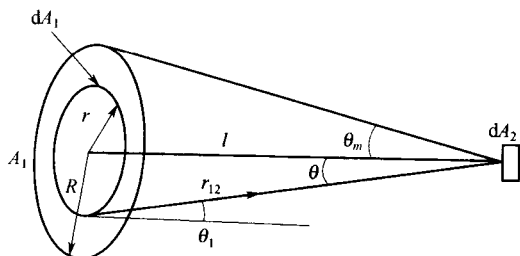


图 1-6 均匀发光圆盘在 dA_2 上的辐射照度

的环带面积为 $2\pi r dr$, 又由几何关系 $r = l \tan \theta$, 则

$$2\pi r dr = 2\pi l^2 \tan \theta \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = 2\pi l^2 \frac{\sin \theta d\theta}{\cos^3 \theta}$$

实际光源总有一定的几何尺寸, 根据光能的叠加原理, 所求表面上某面元的辐射照度, 实际上是该有限尺寸光源上每一面元对该接收面元辐射照度贡献之和。

如图 1-6 所示, 设一辐射亮度为 L 的均匀发光圆盘 A_1 , 半径为 R , 求距发光圆盘为 l 的面元 dA_2 上的辐射照度。

把圆盘 A_1 分成若干个环带, 半径为 r 处